

КОНВЕКТИВНО-ДИФУЗІЙНА МОДЕЛЬ ОЦІНКИ МАСШТАБІВ РАДІАЦІЙНИХ ЗАБРУДНЕНЬ ВОДНИХ СЕРЕДОВИЩ

В. В. Курятников, к.ф.-м.н., доц.
Кафедра екології та охорони довкілля
kuryatnikov1@ukr.net

В результаті збільшення сфери використання радіоактивних речовин у антропогенній діяльності – атомної енергетичної промисловості та ін. зростає забруднення ними навколишнього середовища і як наслідок, відбувається забруднення води. Перенос радіонуклідів водними потоками є основним фактором поширення радіоактивного забруднення у довкіллі.

Вивчення міграції радіонуклідних забруднень в морських районах ускладнюють морські течії, що мають гравітаційне походження і пов'язані із кліматичними та сезонними змінами, що є актуальним.

Мета роботи виділити механізми фізичних процесів, що обумовлюють міграцію радіонуклідних забруднень в райони морського узбережжя північно-західної частини Чорного моря.

Радіаційні забруднення можуть бути розчиненими у воді, а можуть бути у вигляді дисперсної фази речовин, у тому числі і радіоактивних.

Механізми розповсюдження радіаційних забруднень можуть відрізнятися в залежності від агрегатного стану забруднення.

Розглянуті механізми фізичних процесів, що супроводжують міграцію радіонуклідів у водному середовищі. Це процеси гравітаційного осадження дисперсних частинок або спливання їх в результаті дії сили Архімеда, вплив дії сили Коріоліса, а також процеси броунівської дифузії дисперсних частинок, які здатні викликати їх коагуляцію.

Запропонована адвективна модель перенесення радіонуклідів у водному середовищі. Конвективно - дифузійний механізм поширення радіонуклідів має пояснити переміщення домішкової радіоактивної речовини за сумісною дією конвекції та дифузії у воді.

Потік маси води завдається вектором

$$\vec{J}_v = \vec{v} \cdot C.$$

Переніс може здійснюватися течією річки або морськими течіями. В цьому випадку він носить назву адвективного.

Молекулярним переносом маси \vec{J} здійснюється під дією градієнта концентрації (закон Фіка), градієнта температури (закон Соре) та градієнта тиску P :

$$\vec{J} = -D \text{grad} C - K_T \text{grad} T - k_p \text{grad} P,$$

де K_T – термодифузійний коефіцієнт, бародифузійний коефіцієнт, пов'язаний із зміненням хімічного потенціалу в ізотермічному процесі.

Основне рівняння в конвективно-дифузійній моделі, що охоплює перелічені вище механізми, має вигляд:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -\nabla(vC) + D(\nabla^2 C + \frac{K_T}{T} \nabla^2 T + \frac{K_P}{P} \nabla^2 P) + I, \quad (1)$$

де: C – концентрація радіонуклідів, t – час, v – швидкість конвекції (переміщення середовища), I – джерела або стоки радіонуклідів (наприклад, викиди з джерела), D – коефіцієнт дифузії.

Визначимо розподіл концентрації вздовж детермінованого напрямку, який завдається водним потоком (морської течії або річки), що відбувається при заданих крайових умовах. Будемо вважати, що викид речовини відбувається з циліндричної трубки, розташованої вздовж течії. Вважаємо, що адвективний (молярний) механізм переносу маси превалює над молекулярним. Тобто

$$\vec{J}_v \gg \vec{J}.$$

Підставою для цього є малість значень коефіцієнтів дифузії. Значення коефіцієнтів дифузії для водних розчинів (цезію-137) візьмемо за даними [1], вони становлять порядку 10^{-9} м²/с, а для дрібних броунівських частинок (стронцію-90) розміром 0,1 мкм значення коефіцієнта дифузії візьмемо порядку $10^{-10} \div 10^{-11}$ м²/с.

Припустимо, що при витіканні речовини з швидкістю u з труби радіусу R , в ній після вирівнювання швидкостей потоків (v) і (u) утворюється трубка струму радіусом r , через бокову поверхню якої має місце молярна дифузія.

Для спрощення знехтуємо молекулярним переносом, термодифузією та бародифузією і запишемо рівняння переносу маси у наступному вигляді

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -\nabla(vC) + I, \quad (2)$$

У якості крайових умов покладемо, що на поверхні трубки струму механізм масообміну є виключно молярним і густина потоку радіонукліду має вигляд

$$j|_r = \beta(C - C_0)$$

та при $C_0 = 0$:

$$j|_r = \beta C,$$

де β – коефіцієнт масообміну.

Внаслідок стаціонарності усталеного процесу $\frac{\partial c}{\partial t} = 0$.

Функція стоку (джерела) знаходиться із закону радіоактивного розпаду, і визначає кількість радіонукліда, яка розпадається за одиницю часу в одиниці об'єму речовини:

$$I = \frac{1}{V} \cdot \frac{dN}{dt} = \frac{dC}{dt} = -\lambda C,$$

де $\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}}$ - константа розпаду ($T_{1/2}$ - період напіврозпаду радіонукліда).

Направимо вісь ОХ системи координат Декарта вздовж потоку води. Тоді в циліндричних координатах з віссю ОХ у якості циліндричної осі з урахуванням радіальної симетрії:

$$\text{grad}C = \frac{\partial C}{\partial r} \vec{e}_r + \frac{\partial C}{\partial x} \vec{e}_x, \quad \text{div} \vec{J} = \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} (rJ) + \frac{\partial J}{\partial x}.$$

$$\text{Для } j = \beta C, \quad \text{div} \vec{J} = \frac{\beta C}{r} + \beta \frac{\partial C}{\partial x}.$$

З урахуванням наведених виразів при що $\beta \ll v$ рівняння (2) отримає вигляд:

$$v \frac{\partial C}{\partial x} = -\frac{\beta C}{r} - \lambda C. \quad (3)$$

Коефіцієнт масообміну β може бути визначено з критеріального співвідношення

$$Nu_D = \frac{\beta r}{D}.$$

Тоді на великих відстанях від місця викиду розв'язок рівняння (3) можна представити

$$C = C_0 e^{-\frac{x}{v}(b+\lambda)}. \quad (4)$$

де b – фактор розбавлення,

$$b = \frac{\beta}{r} = \frac{Nu_D \cdot D}{r^2}.$$

Отже, зміна концентрації радіонукліда у потоці відбувається за експоненціальним законом, показник степені якого визначається параметром, що є сумою константи розпаду λ і швидкості масообміну β .

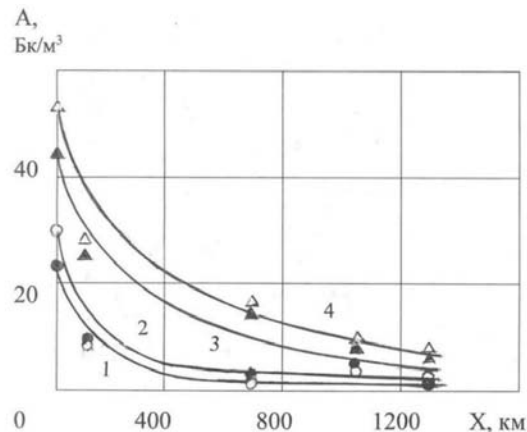
Радіаційна активність води A пропорційна концентрації C радіонукліда у воді, тому з відстанню від місця викиду вона експоненційно спадає.

Користуючись вищеописаною моделлю можна знайти об'ємну активність води уздовж течії на відстані X , (км) від джерела неперервного радіаційного забруднення.

За даними вимірів [2], що зроблені в останні роки, відбувається зменшення об'ємної активності води, забрудненої радіонуклідами Чорнобильського походження, вздовж русла Дніпра, водосховищ Дніпровського басейну та північно західної частини Чорного моря.

Дані вимірювань радіоактивності у окремих фіксованих координатою X місцях Дніпра і Чорного моря за оглядом [2] представимо на рисунку 1 у вигляді експериментальних точок разом із проведеними за допомогою запропонованої моделі розрахунками.

Запропонована конвективно-дифузійна модель масштабного перенесення радіонуклідів у водному середовищі слушно описує трансформацію та зменшення концентрацій радіонуклідів, що надходять із забруднених територій і поширюються у Дніпровському басейні річок та водосховищ, попадаючи у північно західну частину Чорного моря. Це свідчить про суттєву роль дифузійного розбавлення в процесі водної міграції і визначає потребу врахування його при моделюванні водної міграції радіонуклідів.



Δ – дані вимірювань ізоотопів стронцію Sr^{90} у 2019р.; ▲ – дані вимірювань ізоотопів стронцію Sr^{90} у 2020р.; ○ – дані вимірювань ізоотопів цезію Cs^{137} у 2019р.; ● – дані вимірювань ізоотопів цезію Cs^{137} у 2020р.; 1 - об'ємна активність цезію-137 (2020р.); 2 - об'ємна активність цезію-137 (2019р.); 3 - об'ємна активність стронцію-90 (2020р.); 4 - об'ємна активність стронцію-90 (2019р.);

Рисунок 1 - Залежності об'ємної активності A_v води від відстані X

Результати розрахунків за конвективно-дифузійною моделлю міграції радіонуклідів у воді вказують на те, що наявність конвекції сприяє збільшенню масштабів розподілу домішок (іншими словами, сприяє більш широкомасштабному поширенню домішок).

Висновки роботи та практичне значення роботи полягають в розробці алгоритмів моделі водної міграції радіонуклідів, придатної для прогнозування критичних режимів фізичних процесів, яка може служити інструментом для підготовки відповіді на екологічні аварії, пов'язані з радіоактивними забрудненнями.

Перелік посилань

1. Movchan T. G. et al. Diffusion coefficients and viscosities of aqueous solutions of alkyltrimethylammonium bromides. *Colloid Journal*. 2015. Т. 77. С. 179-185.
2. *Огляд стану забруднення навколишнього природного середовища на території України за даними спостережень гідрометеорологічних організацій у 2020 році*. Київ: Центральна геофізична обсерваторія ім. Бориса Срезневського, 2021. 43с.
<http://cgo-sreznevskiy.kyiv.ua/data/ukr-zabrud-viz-1/oglyad-stanu-zabrudnennya-2020-sayt.pdf>